



## UNDÉCIMO ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ – XI ERIAC

COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO DEL CIGRÉ  
22 al 26 de mayo 2005 – Hernandarias – Paraguay

### COMPATIBILIZACIÓN DE PERTURBACIONES DE VARIADORES DE VELOCIDAD DE MOTORES CON REDES DE AT

P.E. ISSOURIBEHÉRE, G.A. BARBERA, F. ISSOURIBEHÉRE  
IITREE-UNLP

Argentina

**Resumen** – El artículo trata el comportamiento de plantas de Grandes Usuarios que poseen cargas perturbadoras y requieren la habilitación por parte de la Empresa Prestataria del Servicio Eléctrico para ser alimentados desde la red pública. Se analiza un caso particular de plantas alimentadas en AT con variadores de velocidad de motores. Se comentan los inconvenientes causados por estas cargas en las instalaciones propias del Usuario y el impacto que generan dichas plantas sobre las redes de las que son alimentados. Se tratan desde los problemas suscitados en la puesta en marcha de las plantas con las correspondientes soluciones en cada caso hasta las mediciones finales realizadas con fines de habilitación.

**Palabras clave:** Armónicas - Compatibilidad Electromagnética - Emisión - Mitigación - Perturbaciones - Variadores de velocidad.

## 1 INTRODUCCIÓN

Se trata de un sistema de transporte con más de 500 km de longitud que vincula una cabecera y su correspondiente terminal. Con el propósito de aumentar la capacidad de transporte, se construyeron cuatro Plantas de impulsión equidistantes entre sí a lo largo del mismo, llamadas A, B, C y D en el texto. Un esquema de la situación se presenta en la Fig. 1.

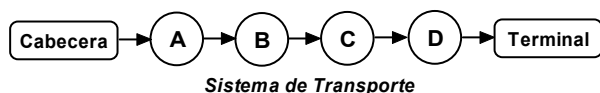


Fig. 1. Sistema de transporte con las 4 Plantas.

Estas cuatro Plantas, las que se encuentran alimentadas en 132 kV, son exactamente iguales. Cada una de ellas cuenta con dos bombas accionadas por sendos motores de 3500 HP cada uno (1492 RPM de velocidad nominal) y un solo variador de velocidad del tipo

Modulación por Ancho de Pulso (PWM). Este último, alimentado en 6,6 kV, convierte la tensión alterna a una continua y luego esta continua a una nueva alterna de frecuencia variable. La Fig. 2 representa el proceso de conversión.

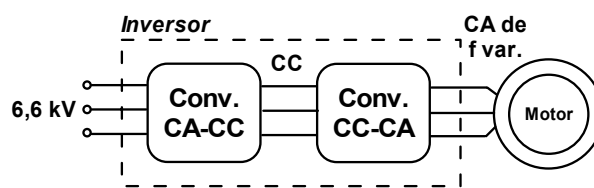


Fig. 2. Modelo del Inversor.

El propósito de este variador de velocidad es poder controlar el estado de las bombas para obtener un control continuo de la presión y el caudal de lo transportado. Esto es manejado en forma conjunta por las cuatro Plantas.

Los modos normales de operación de cada Planta, dependiendo del estado del sistema en general, son con una sola bomba comandada por el variador de velocidad, o con una bomba conectada en directo a la red y la restante comandada por el variador. En este último caso es el mismo variador que primero lleva una bomba hacia su funcionamiento en régimen estable y luego pasa a comandar la restante.

El variador siempre se encuentra comandando a al menos una de las dos bombas que existen en cada Planta.

## 2 ANOMALÍAS SUSCITADAS

Al poner en funcionamiento las respectivas Plantas se presentaron distintos inconvenientes técnicos, causados principalmente por el funcionamiento del variador. Este elemento alineal representa la principal carga de cada Planta, ya que el resto de las mismas está compuesto prácticamente por servicios auxiliares.

Los inconvenientes detectados fueron esencialmente dos y aunque ambos fueron causados por el variador de velocidad, son de distinta naturaleza.

Por un lado, en el proceso de conversión de CC a CA, producido en MT, se presenta una señal pulsante de alta frecuencia encargada de generar la onda senoidal de frecuencia variable. Esta señal de alta frecuencia hace circular una corriente espuria a través de las capacidades parásitas de los cables, lo que provoca perturbaciones de modo común en la onda de tensión en MT.

Estas perturbaciones, al ser de modo común, no se presentan en las tensiones compuestas. Al ser el secundario del transformador AT/MT en  $\Delta$  no se propagan aguas arriba, por lo que no aparecen en el Punto de Suministro al Usuario desde la Empresa Prestadora del Servicio Eléctrico. Por lo tanto no constituyen un problema Usuario - Red Pública. De todos modos, sí causaron inicialmente inconvenientes en la red interna de la Planta. Se presentaron problemas de compatibilidad electromagnética que generaron mal funcionamiento de protecciones digitales e interferencia en redes de datos.

Por otro lado, en el proceso de conversión de CA a CC, también realizado en MT, se rectifica la señal de entrada por medio de dispositivos semiconductores de potencia. En este proceso de conversión se generan armónicas de la señal de 50 Hz en la corriente que, dependiendo de la potencia de cortocircuito de la red, pueden afectar o no a la tensión de suministro.

De acuerdo a la reglamentación vigente en Argentina, para la habilitación de Grandes Usuarios del Sistema Argentino de Interconexión se requiere evaluar el impacto que las Plantas producen en las redes de alimentación. Para lo cual, es necesario efectuar mediciones de armónicas en el Punto de Suministro.

Se efectuaron entonces mediciones con instrumental apropiado y posteriores estudios de ambos fenómenos. A continuación se presentan las particularidades más relevantes de cada uno de los casos.

### 3 PERTURBACIONES DE ALTA FRECUENCIA

#### 3.1. Detección de la perturbación

Al poner en servicio la primera Planta, B según el diagrama de la Fig. 1 se presentaron los inconvenientes descriptos en el apartado anterior.

Se asistió al lugar para efectuar distintos tipos de mediciones con el propósito de evidenciar lo que estaba ocurriendo.

Mediante un Adquisidor-Registrador de 8 canales aislados, con conversor de 12 bits y una frecuencia de muestreo de 200 kmuestras por segundo, se realizaron registros de tensiones y corrientes en distintos puntos de la Planta con el propósito de comprobar la presencia de perturbaciones de modo común de alta frecuencia, típicas en instalaciones de este tipo.

Un diagrama unifilar muy simplificado de la Planta en cuestión (e idéntico a los de las tres restantes) se presenta en la Fig. 3. En esta gráfica se ha indicado el

Punto de Suministro entre la Empresa Prestadora del Servicio Eléctrico y el Usuario.

Los registros se efectuaron en los puntos 1 y 2 de la figura, esto es en 6,6 kV y BT, respectivamente.

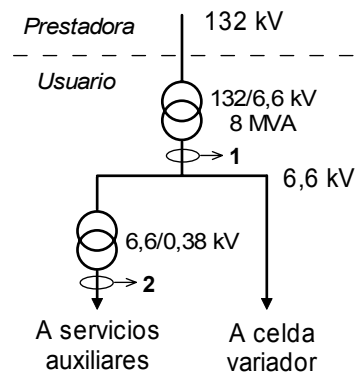


Fig. 3. Diagrama unifilar simplificado de las Plantas.

Con la Planta sin operar, no se observó ningún tipo de perturbación ni en la tensión ni en la corriente.

Al comenzar a funcionar la planta, se manifestaron perturbaciones de alta frecuencia de modo común en la tensión. En la Fig. 4. se presenta un oscilograma de las tres tensiones fase-tierra registrado en el Punto 1 de la Fig. 3. El mismo fue capturado durante el comienzo del funcionamiento de la planta con el variador.

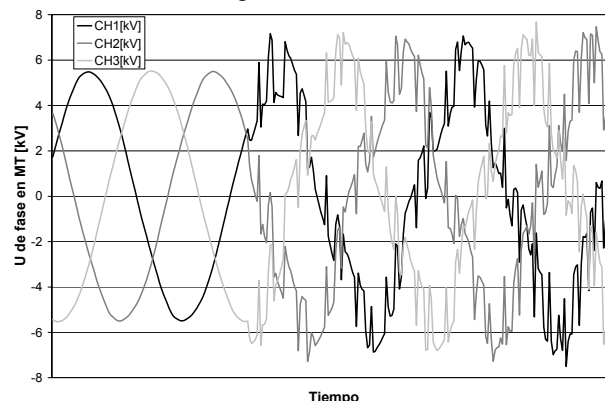


Fig. 4. Oscilograma de las tensiones fase-tierra en el comienzo de la operación.

De la gráfica se observa una importante perturbación de alta frecuencia desde el comienzo de la operación. Se destaca que, debido a dicha perturbación, la tensión de fase pico pasa de 5,5 kV a 7,3 kV.

Para comprobar si el fenómeno se corresponde con una perturbación de modo común se efectuó un registro de las mismas tensiones de fase pero con una mayor resolución. En la Fig. 5 se muestra un oscilograma de las tensiones fase-tierra ampliado. Corresponde a un intervalo de medio ciclo de duración (10 ms). En dicha gráfica se observa perfectamente que la señal es de modo común, es decir que se presenta con la misma fase en las tres tensiones.

El fenómeno presenta dos secuencias de repetición. La primera de ellas, dada por la onda cuadrada que se encuentra vinculada a la frecuencia de *muestreo* del inversor. La segunda, en cambio, parecería tener origen en alguna frecuencia natural del sistema. Esta última,

que es la más notable, se encuentra en una frecuencia cercana a los 8,3 kHz.

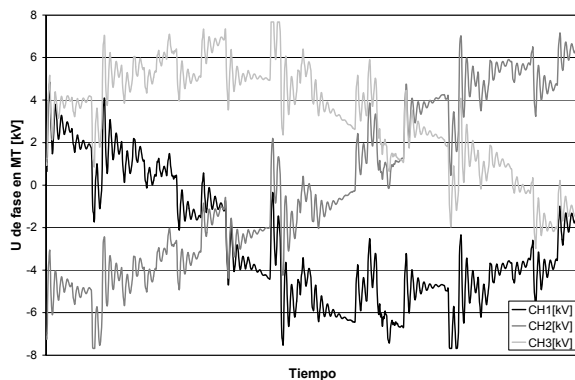


Fig. 5. Oscilogramas de tensión fase-tierra ampliado.

Para confirmar lo anterior se llevó a cabo un registro de tensión fase-fase para la misma condición de funcionamiento, en la Fig. 6 se presenta el oscilograma.

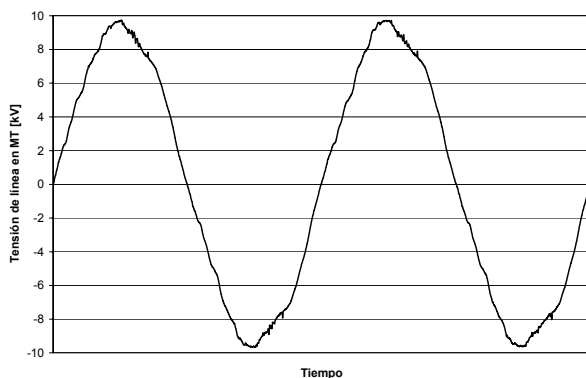


Fig. 6. Oscilograma de la tensión fase-fase.

Como era de esperar esta señal no posee la importante perturbación existente en las tensiones de fase.

Dado que en la planta se habían presentado ciertos inconvenientes en la red de BT se realizaron registros en este nivel de tensión para comprobar la existencia de perturbaciones.

En la Fig. 7 se presentan registros obtenidos en BT en la tensión de línea y la tensión de fase. Se observa que ninguna de estas señales contiene la perturbación. Esto se debe a que el transformador MT/BT de la planta es  $\Delta$ - $\Delta$ , el cual toma en su primario la tensión compuesta que como se vio no posee la perturbación. Por lo tanto, esta perturbación de modo común tampoco se propaga aguas debajo de MT, por lo que no va en detrimento del equipamiento de BT.

La explicación de la presencia de esta perturbación de modo común en 6,6 kV, se ilustra en el esquema simplificado de la Fig. 8.

Las tensiones conmutadas a la salida del inversor derivan corrientes a tierra a través de las capacidades parásitas de los cables que van hacia el motor. Estas corrientes circulan por tierra volviendo a la fuente por un circuito aguas arriba del convertidor.

A partir de lo que se conoce de la instalación parecería que las corrientes retornan por el centro de estrella del transformador AT/MT, pasan a través de las capacidades del mismo y retornan al inversor.

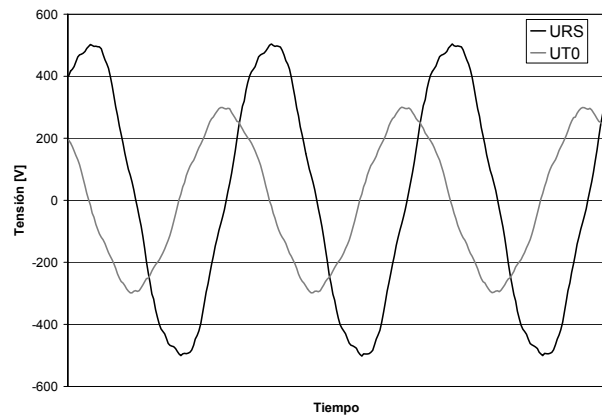


Fig. 7. Oscilogramas de tensión de línea y fase en BT.

Dado que estas señales espurias se encuentran circunscriptas en el lazo trazado en la Fig. 8, las mismas no se transfieren aguas arriba del transformador y por lo tanto no son vistas en el Punto de Suministro.

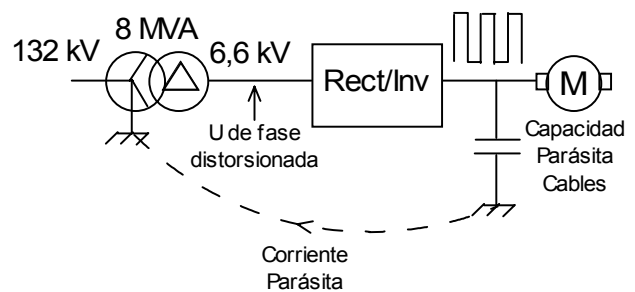


Fig. 8. Esquema de la situación.

### 3.2. Mitigación de las perturbaciones

La solución clásica a este tipo de problemas es, por medio de la instalación de un filtro, bajar la impedancia de m.c. a la entrada del Rectificador/Inversor a la frecuencia de la perturbación. Además, es recomendable blindar el cable de acometida al motor para evitar que las corrientes parásitas perturben por inducción a equipos susceptibles.

En la Fig. 9 se muestra en forma sólo indicativa cómo sería la forma de implementar esta solución.

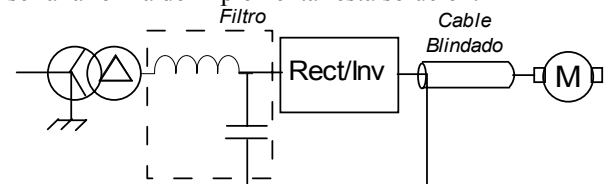


Fig. 9. Solución para la mitigación de la perturbación de modo común de alta frecuencia.

De este modo, la perturbación de alta frecuencia quedaría circunscripta en el lazo comprendido entre el cable que va hacia el motor y el filtro ubicado en la entrada del convertidor, lográndose que la tensión fase-tierra de frecuencia industrial quede "limpia".

Otra alternativa práctica es la de no instalar mediciones, protecciones y transductores respecto a tierra, sino fase-fase como realmente corresponde en una instalación de potencia con neutro aislado. Esta tensión no está contaminada con las perturbaciones originadas por la máquina PWM.

## 4 ARMÓNICAS

### 4.1. Evaluación de la Planta

Además del fenómeno tratado precedentemente, en el proceso de conversión de CA a CC, se generan armónicas de la frecuencia industrial de 50 Hz.

A diferencia del anterior, este tipo de perturbación sí se transfiere aguas arriba del transformador AT/MT - las armónicas de secuencias directa e inversa, no así las múltiplos de 3 que son homopolares y por ende retenidas por el triángulo - y debe evaluarse su efecto sobre la red pública.

La Empresa Prestadora y el Usuario acordaron emplear la Norma IEEE Std. 519-1992 como parámetro para definir niveles de armónicas a cumplir por el Usuario.

Para comenzar la puesta en marcha de las plantas, en lo concerniente a armónicas se efectuaron mediciones preliminares a las que certificarían y habilitarían la puesta en marcha oficial de las Plantas.

En la Fig. 10 se muestra el estado operativo de la Planta, a través del registro de potencia activa a lo largo de la jornada de medición.

En la gráfica se ha indicado, además de la potencia activa, el estado operativo de la Planta para cada periodo. Entre dos estados sucesivos estables, se produce un transitorio dado por la inercia del proceso.

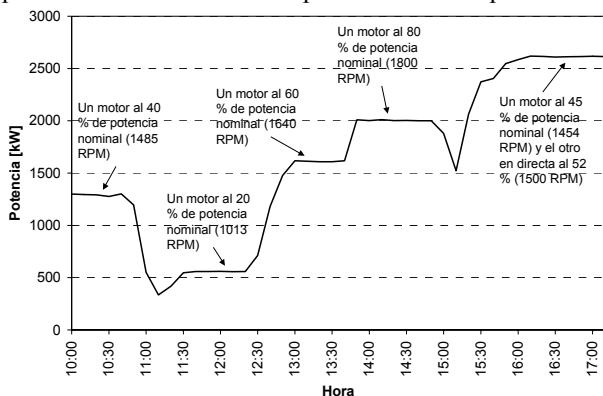


Fig. 10. Estados en los que funcionó la planta para su evaluación previa en cuanto a armónicas.

### 4.2. Aparición de armónicas pares

Se comenzó analizando las corrientes armónicas emitidas hacia la red.

Se observó que con un motor funcionando al 80 % de su potencia nominal y girando a 1800 RPM se producía un importante aumento en la emisión de armónicas pares - no muy frecuentes en instalaciones industriales - por parte del variador.

Las armónicas que se presentaron en mayor grado fueron la 2ª y la 4ª, cuyos perfiles se muestran en la Fig. 11, pero también se produjeron importantes incrementos en la 8ª, la 14ª y la 16ª.

La emisión superaba los límites previstos.

El fabricante encontró que al trabajar al motor por encima de su velocidad nominal (1492 rpm) el lazo de control imponía una condición de reducción de flujo con la tensión fija e igual a la máxima. El flujo no se reducía tanto como lo deseado, lo que producía una inestabilidad en el algoritmo de control que actuaba

sobre el ángulo de disparo de los tiristores y consecuentemente producía un funcionamiento anómalo del dispositivo.

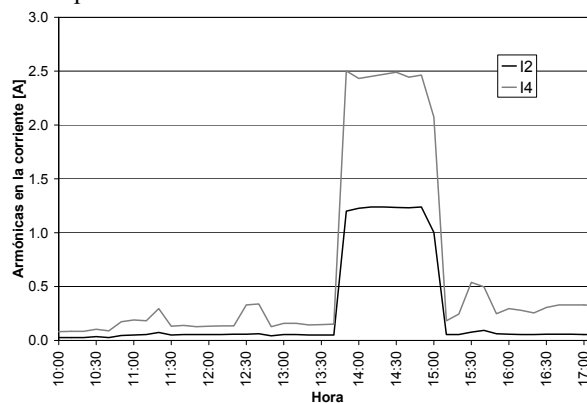


Fig. 11. Perfil de 2ª y 4ª armónica en la corriente.

Al cambiar el *firmware* del equipo se logró que esta situación de inestabilidad al superar la velocidad nominal desapareciera. Esto se comprobó mediante nuevas mediciones con las que se determinó que las armónicas pares en la corriente, en cualquier estado de operación, cumplían con los límites de norma.

### 4.3. Problema de la 5ª armónica

Al progresar con las verificaciones previas, y solucionado el problema de la emisión de armónicas pares, se encontró una importante circulación de corriente de 5ª armónica. Esta corriente circulaba al energizar la celda del variador, aún estando éste sin funcionar.

En la Fig. 12 se muestra un oscilograma de tensión de fase y corriente en 6,6 kV en esta condición. La tensión no presenta perturbaciones a simple vista. Sin embargo, la corriente sí presenta un fuerte contenido de 5ª armónica.

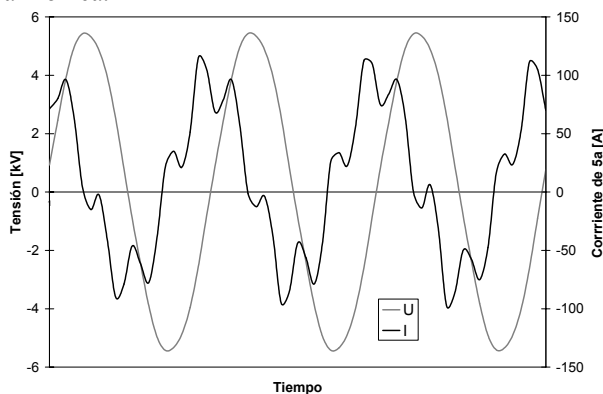


Fig. 12. Oscilograma de tensión y corriente con la celda del variador energizada, pero éste sin operar.

Se encontró que el equipo variador de velocidad contaba en su entrada con un filtro compuesto por un inductor y un banco de capacitores de 1200 kVAr, cuya función es la de filtrar hacia la red las perturbaciones originadas en el proceso PWM. (Observar en la Fig. 12 que la corriente se encuentra 90° en adelante a la tensión ya que prácticamente la única carga presente en este instante es la capacidad de la celda).

Dada la presencia de dicha capacidad como principal carga bajo esta condición - celda variador energizada, pero sin operar - se estudió una posible resonancia de ésta con la inductancia del filtro más el transformador AT/MT a una frecuencia cercana a la 5ª armónica.

A partir de los datos del transformador puede obtenerse que la frecuencia de resonancia del circuito es de 245 Hz, lo que es prácticamente la 5ª armónica.

Por lo tanto, la carga presenta una impedancia extremadamente baja a la 5ª armónica, con lo cual la componente de 5ª armónica de la tensión suministrada por la Empresa Prestadora, aunque no sea de gran magnitud - ver oscilograma de la tensión en la Fig. 12 - genera una importante componente de 5ª en la corriente. El fabricante calcula el filtro para una resonancia entre la 5ª y la 6ª armónica, a  $S_{cc}$  infinita. Para una red real la sintonía se corre hacia la 5ª. Para mitigar este inconveniente es necesario correr la frecuencia de resonancia hacia otra posición en el espectro.

Dado que la única variable en la que se podía intervenir era la capacidad, se varió su valor, desde los 1200 kVAr de proyecto a 800 kVAr (valor práctico dada la modularidad de 400 kVAr del diseño).

En la Fig. 13 se muestra la respuesta en frecuencia del sistema para los dos valores de capacidad - anterior y nuevo. Se observa que en el primer caso la resonancia cae aproximadamente en la 5ª armónica. En cambio, para el segundo valor de capacidad, la frecuencia de resonancia cae prácticamente en los 300 Hz, frecuencia que se corresponde justamente con la 6ª armónica.

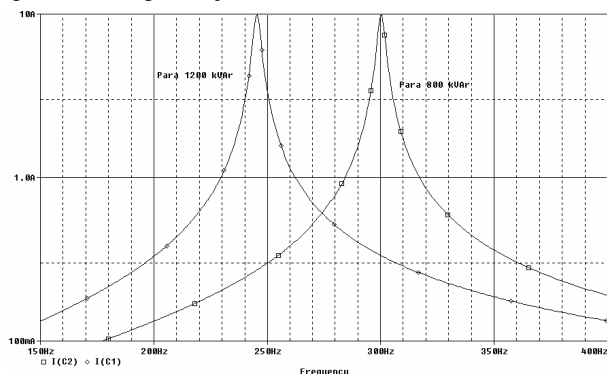


Fig. 13. Respuestas en frecuencia del sistema según la capacidad de entrada del variador, 1200 y 800 kVAr.

Se creó entonces una situación de compromiso en la que resulta más ventajosa la segunda posibilidad. La razón de esto es que los niveles de 6ª armónica presentes en la tensión son prácticamente nulos. De esta manera, por más que el circuito presente una baja impedancia en esta componente, la corriente que va a circular es muy pequeña. Se implementó la mejora sistemáticamente en todas las Plantas. Se comprobó, a partir de nuevas mediciones, un marcado descenso de la 5ª armónica y un ligero y tolerable aumento de la 6ª.

#### 4.4. Impacto de las Plantas sobre el sistema

Solucionados los inconvenientes en las corrientes armónicas circulantes mencionados, se procedió a analizar los valores de armónicas de tensión en el Punto de Suministro en 132 kV y a compararlos con los

establecidos en la Norma de referencia adoptada, la IEEE Std. 519-1992.

Los resultados de estas nuevas mediciones arrojaron, por momentos, valores de 5ª armónica en la tensión por encima de lo establecido en la Norma. Ésta estipula como valor máximo para la 5ª armónica, para este nivel de tensión, 1,5 % y se registraron valores de casi 2,5 %. El perfil obtenido se muestra en la Fig. 14.

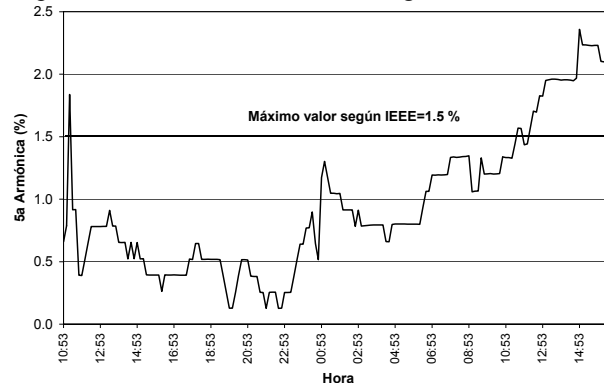


Fig. 14. Perfil de 5ª armónica en la tensión.

El resto de las armónicas se encontraba por debajo de los niveles de la Norma.

Surgió inmediatamente la necesidad de esclarecer de dónde provenía dicha 5ª armónica.

Dado el antecedente tratado en el Punto 4.3, debió prestarse suma atención a este fenómeno presente ahora en la tensión, puesto que podría deberse a una acción por parte de la planta.

Para dilucidar si la perturbación era provocada por la Planta o se encontraba en la onda de tensión brindada por la Empresa Prestadora se efectuó un registro continuo de la 5ª armónica de tensión en una de las Plantas y dejar durante un tiempo prolongado la planta sin operar. En caso de registrarse valores elevados de U5 sólo con la Planta bombeando, se concluiría que la perturbación es producida por el usuario. De lo contrario, si existiesen elevados valores de U5 aún con la Planta sin funcionar el problema sería ajeno al Usuario y pasaría a ser de la Empresa Prestadora.

En la Fig. 15 se presentan los perfiles de 5ª armónica en la tensión y de potencia tomada por la Planta. Se ha indicado con línea punteada el límite de U5 según la Norma en cuestión.

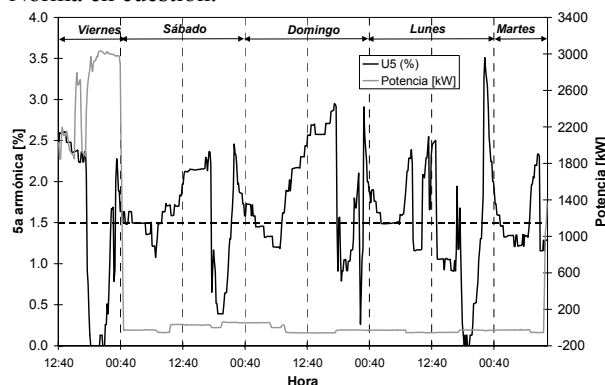


Fig. 15. Perfil de 5ª armónica en la tensión y de la potencia que toma la Planta.

De acuerdo a la potencia registrada se observa que la planta funcionó normalmente durante el primer día de registro y luego dejó de hacerlo durante el resto de la medición. Sólo quedaron funcionando los servicios auxiliares de la Planta-.

El resultado obtenido fue concluyente: Hubo transgresión de los límites con y sin la Planta bombeando. De hecho, los niveles más altos registrados se presentaron en pasajes en que la Planta se encontraba fuera de servicio.

Por lo tanto, los niveles de 5ª armónica registrados en la tensión que alimenta a las Plantas no tenían relación alguna con la emisión de armónicas por parte de las mismas. Por otra parte, se encontró que durante todos los días de medición se produjo una sustancial caída en el nivel de  $U_5$  entre aproximadamente las 18:00 y las 23:00. Esto indicaría que la perturbación sería provocada quizás por algún otro Gran Usuario de la Empresa Prestadora, que sale de servicio en las horas de pico, lo que es habitual por el mayor costo de demanda y energía.

Como conclusión de este análisis de incidencia de las Plantas sobre la red de alimentación se puede afirmar que no producen impacto alguno.

## 5 MEDICIONES PARA HABILITACIÓN

Una vez que se estudiaron y mitigaron todos los focos de posible incidencia de las cuatro Plantas sobre la red de alimentación se llevaron a cabo las mediciones oficiales con fines de habilitación.

Las mismas tuvieron una duración de una semana en cada sitio y se registraron todas las armónicas hasta la 40ª. La mejor forma de mostrar los resultados obtenidos es a través de un diagrama de barras comparativo de las cuatro Plantas. Éste es el que aparece en la Fig. 16.

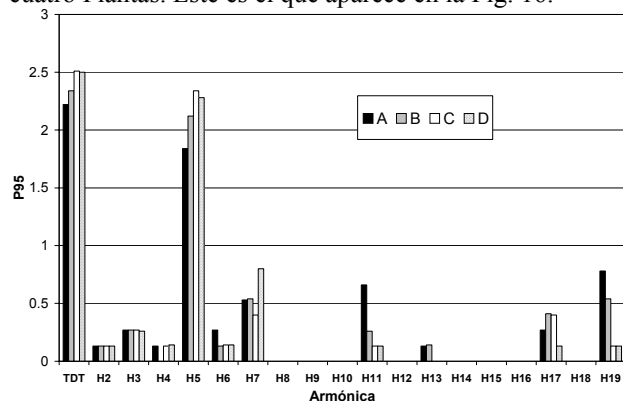


Fig. 16. Armónicas medidas en las 4 Plantas. Se observa un alto contenido de 5ª armónica en la tensión que alimenta a las cuatro Plantas. Los niveles encontrados fueron del mismo orden en todos los sitios. Si bien los niveles registrados superaron a los de referencia, el contenido armónico presente no es de suma importancia.

Finalmente, dado que fue probado que esta perturbación de 5ª armónica no era provocada por las Plantas (Punto 4.4), las mismas fueron habilitadas para comenzar con su operación normal.

## 6 CONCLUSIONES

- Al solicitar la conexión al sistema eléctrico un Gran Usuario que posee este tipo de cargas, variadores de velocidad o alguna otra del tipo alineal es necesario por parte de la Empresa Prestataria del Servicio tomar los recaudos necesarios en cuanto a la posible emisión por parte de éstos de perturbaciones hacia la red.
- Se detectaron perturbaciones de alta frecuencia de modo común, las que no se propagaron hacia la red pública.
- Al detectar la presencia de armónicas en determinado Punto de Suministro se requiere un riguroso análisis con el propósito de determinar su origen.
- Un Gran Usuario, al incorporar a sus instalaciones equipamiento tal como el analizado en esta ocasión debería realizar un estudio previo evaluando tanto las distintas problemáticas que puede provocar en su propia instalación como su impacto hacia la red.
- Los estudios realizados demostraron que las plantas, mas allá de contar con cargas alineales, no provocaron efectos perturbadores sobre la red.
- Se detectó la presencia de 5ª armónica en la tensión de alimentación, la que debido a un comportamiento repetitivo en los diferentes días podría ser provocada por algún otro Gran Usuario alimentado desde la misma red.

## 7 REFERENCIAS

- [1] IEEE Std. 519-1992. "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems".
- [2] Issouribehere P., Esteban D, Issouribehere F. "Solución de Interferencias por la Emisión en RF de redes PWM drivers". CIDEL Argentina 2002. Buenos Aires, Argentina. Noviembre 2002.
- [3] Mohan, Undeland, Robbins, "Power Electronics".